

無線LANによる機器間同期制御技術

Inter-Device Synchronous Control Technology for IoT Systems Using Wireless LAN Modules

東坂 悠司 坂本 岳文 土井 裕介

■ TOHZAKA Yuji ■ SAKAMOTO Takafumi ■ DOI Yusuke

IoT (Internet of Things) の普及に伴い、IoTシステムのより効率的な運転を実現するために、無線による機器間の相互接続と協調動作が重要になる。無線による正確なタイミング同期は、IoTシステムにおいて、複数の機器の協調動作を可能にするための課題の一つである。

東芝は、既存の無線LANモジュールを用いて、複数の機器が高精度にタイミングを合わせて協調動作することを可能にする無線同期制御システムを開発した。協調動作のためのタイミング信号は各機器に接続された無線LANモジュールから供給し、これを実現するための機能は全て無線LANモジュール内にソフトウェアとして実装した。CPUで処理される他のタスクによるランダムな遅延(ジッタ)の影響による同期誤差を補償するアルゴリズムを考案し実装することにより、ジッタが最大の場合でも約±200 μs以内の精度で同期できることを実機で確認した。これにより、高精度に同期したIoTシステムを、新たなハードウェアを追加することなく、既存の無線LANシステムと同等のコストで実現できる。

Accompanying the expansion of the Internet of Things (IoT), interconnections between multiple devices and their cooperative operation via wireless LAN modules have become essential to achieve more efficient functioning of IoT systems. Timing synchronization through wireless communication has therefore become an issue of vital importance for various IoT systems.

Toshiba has developed a wireless synchronous control system that can establish synchronization between multiple devices with a high degree of accuracy using existing wireless LAN modules. The timing signal for cooperative operations is provided by the wireless LAN module attached to each of the devices, in which all additional functions are implemented as software. Experiments on a system using wireless LAN modules that implement a set of algorithms to compensate for synchronization errors due to jitter caused by other tasks running on the CPU have confirmed that it achieves a synchronization accuracy within approximately ±200 μs even in the worst-case jitter scenario. It is expected that IoT systems incorporating this wireless synchronous control system will be able to be constructed at a cost equivalent to those employing a conventional wireless LAN system without any need for additional hardware.

1 まえがき

IoTと呼ばれる一連の技術分野においては、様々な機器が通信技術により一体となって動作することが期待される。例えば、複数のインバータを協調制御して効率的に運転する電力システムや、複数のディスプレイを用いて映像を同期再生するデジタルサイネージシステム、多数の産業用ロボットによる協調作業など、様々な応用が考えられる。

これらを実現するためには、複数の機器を同時に、あるいは一定間隔ごとに動作させるための同期制御技術が必要になる。一方、前述の応用における通信には、機器の配置を容易にするために無線化が求められ、制御情報やコンテンツデータを共有するために高い通信速度が求められる。この場合、IEEE 802.11^(*)(電気電子技術者協会規格 802.11)⁽¹⁾に基づく無線通信(いわゆる無線LAN)が有効である。

ここでは、無線LANにより接続された複数の機器を高精度に連携させるために東芝が開発した、無線LAN上での同期制御技術について述べる。

2 無線LANによる同期制御技術

2.1 従来の課題

IoTにおいては、安価で、かつ実用上十分な精度で同期を実現する方式が求められている。アプリケーションにより異なるが、例えば前述のデジタルサイネージでは $1/120\text{ s} = 8.3\text{ ms}$ 程度の精度での同期が求められる。

特に、無線LANをはじめとする通信用無線規格においては、ノイズや通信の衝突などに由来した通信失敗に対処するために、MAC(メディアアクセスコントロール)層^(注1)における自動的な再送制御や送信待ちが頻繁に発生する。その結果、通信に掛かる時間に不確実性が生じる。通信を用いた同期技術の一つであるNTP(Network Time Protocol)では、数十ms程度の同期誤差を生じるため、デジタルサイネージの場合にはディスプレイ間の表示フレームがそろわない結果となる⁽²⁾。また、専用ハードウェアを追加した無線同期システムを用いれば

(注1) 通信媒体の利用方法を制御する機能層。

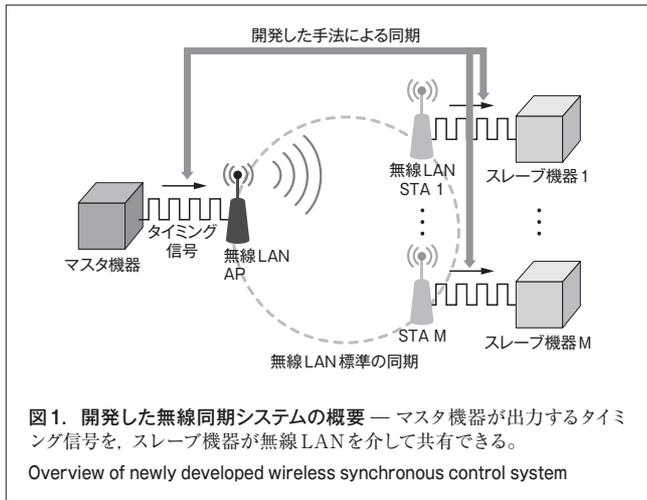


図1. 開発した無線同期システムの概要 — マスタ機器が出力するタイミング信号を、スレーブ機器が無線LANを介して共有できる。
Overview of newly developed wireless synchronous control system

1 μ s以下の精度での同期も可能であるが、高価なシステムになってしまう⁽³⁾。

2.2 無線同期システムの概要

今回開発した無線同期システム⁽⁴⁾の構成を図1に示す。このシステムは、一つのマスタ機器が生成する、システム全体の同期の基準となる周期的なタイミング信号を、無線システムを利用して複数のスレーブ機器に伝達する。マスタ機器には無線LANアクセスポイント（親機。以下APと呼ぶ）が接続され、マスタ機器はタイミング信号をAPに入力する。スレーブ機器にはそれぞれ一つの無線LANステーション（子機。以下、STAと呼ぶ）が接続される。STAはAPに入力されたタイミング信号と同期した信号を出力し、スレーブ機器はこれを受けてマスタ機器や他の機器とタイミングを合わせた動作を行う。

開発したシステムは、IEEE 802.11⁽⁹⁾により無線LANチップが標準で備える時刻同期機能（TSF：Timing Synchronization Function）を利用して実現される。TSFにより同期される時計（TSFタイマ）は1 μ sごとにカウントアップされ、STAがAPから定期的に（標準的には100 msに1回）通知される時刻情報で自身の時計を更新することで同期される。TSFタイマは通信制御に用いられることから、MAC層における再送や送信待ちの影響を受けず、高精度で同期される。

そこで、開発したシステムでは、APは入力されるタイミング信号のパラメータを、TSFタイマを基準に推定し、STAに通知する（図2）。STAはパラメータを受信すると、TSFタイマを基準にタイミング信号を再生して調整する。

この技術は、既に製品化されている当社製無線LANモジュール上の無線LANチップ内にソフトウェアとして実装することが可能である。これにより新たなハードウェアを追加することなく、また、同期の基準となる信号の外部入力にも対応した実用的な無線同期システムを構築できる。

2.3 ソフトウェア実装の課題と対策

無線LANチップは、ソフトウェアを実行するCPUや、ソフト

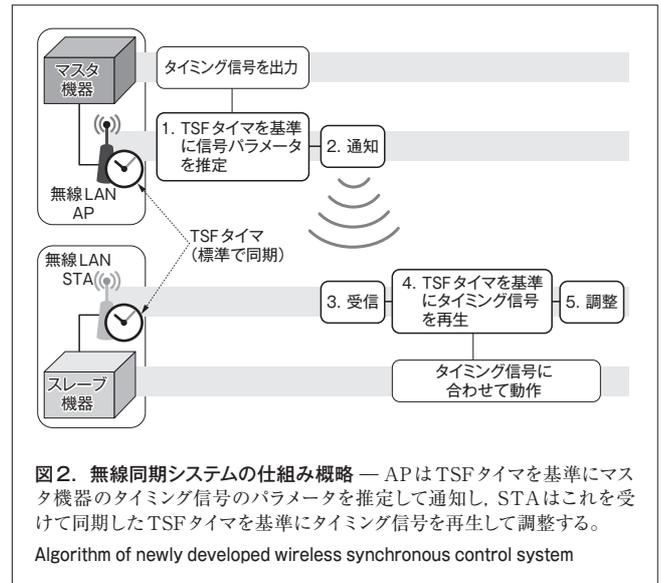


図2. 無線同期システムの仕組み概略 — APはTSFタイマを基準にマスタ機器のタイミング信号のパラメータを推定して通知し、STAはこれを受けて同期したTSFタイマを基準にタイミング信号を再生して調整する。
Algorithm of newly developed wireless synchronous control system

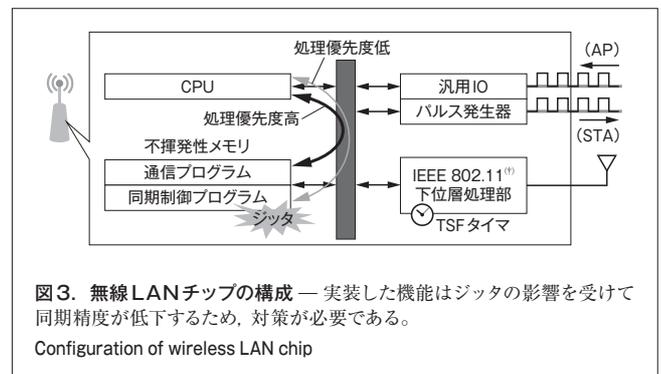


図3. 無線LANチップの構成 — 実装した機能はジッタの影響を受けて同期精度が低下するため、対策が必要である。
Configuration of wireless LAN chip

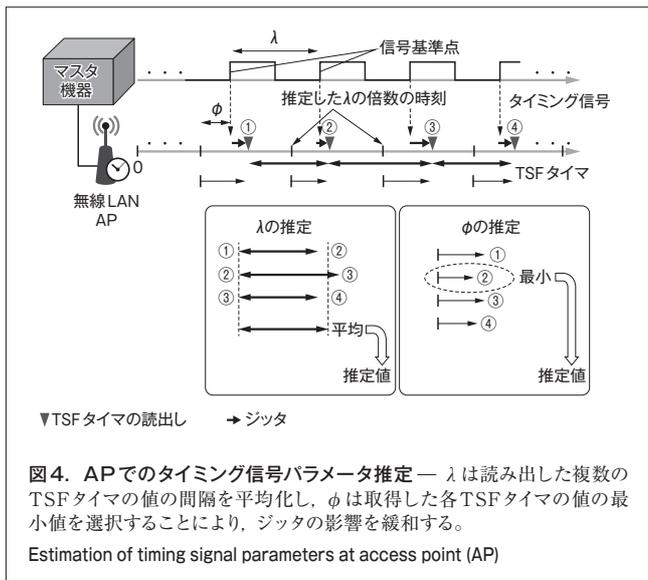
ウェアを格納する不揮発性メモリ、タイミング信号を出力するパルス発生器、汎用入出力回路（IO）などを含む各種の周辺回路から成る（図3）。

この無線LANチップ上のCPUは、無線LANの通信プログラムの処理を最優先で実行し、今回開発した同期制御プログラムを含め、ユーザーが追加したソフトウェアタスクは全て低い優先度で実行する。その結果、通信処理実行中には同期制御が実行されず、実行タイミングにランダムな遅延（ジッタ）が生じる。このジッタが、同期制御の精度が低下する原因となる。

これを解決するため、ソフトウェア実装で、APにおけるマスタ機器から入力されるタイミング信号のパラメータ推定と、STAにおけるタイミング信号の再生について、ジッタの影響を抑える方法が必要である。

2.3.1 APによるタイミング信号のパラメータ推定と通知

開発した技術におけるAPの処理の概略を図4に示す。APは、入力されるタイミング信号のパラメータとして周期 λ とオフセット ϕ を、TSFタイマを基準に推定する。ここで ϕ とは、TSFタイマ上の周期の整数倍の時刻に対する信号基準点（図4の例ではパルス信号の立ち上がりエッジ）の時間差である。前述の



とおり、信号パラメータ推定タスクの起動時刻はジッタの影響を受けるため、ここで述べる方法を用いてジッタを抑制する。

図4に示すように、パラメータを推定するために、APでは図3に示した汎用IOへの入力となるタイミング信号の立ち上がりでCPUへの割込みを行い、この割込みにより起動されたタスクがTFSFタイマの読出しを行う。読み出されたTFSFタイマの値はジッタにより実際のタイミング信号の立ち上がりの瞬間からランダムに遅延している。

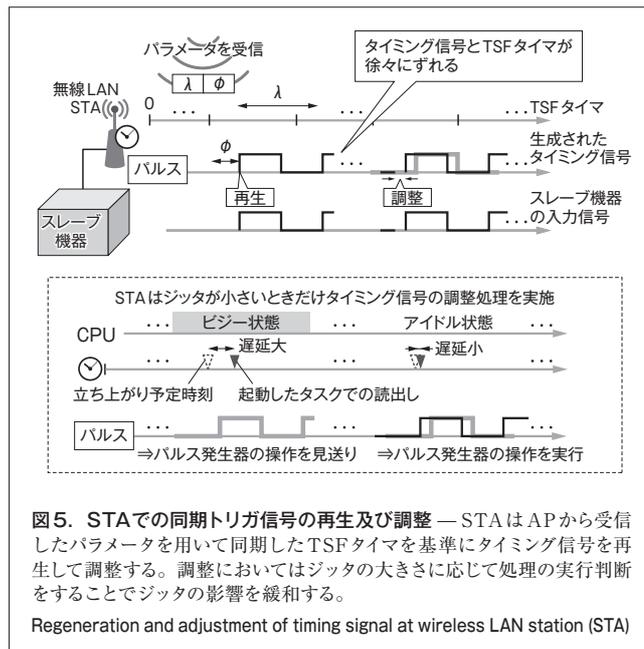
そこでまず、λの推定では、取得した複数のTFSFタイマの値の間隔を平均化することで、ジッタの影響を緩和してより正確な値を求める。

次に、φの推定では、先に推定したλを用いて、取得した複数のTFSFタイマの値それぞれでφを求める。これにより各TFSFタイマの値が受けたジッタの影響を比較でき、最小のφを推定結果とすることで、ジッタの影響を緩和できる。

これらの推定は定期的に行い、初回及び一定のしきい値を超えてλあるいはφがずれた際に、無線LANの通常データ通信でSTAにパラメータを通知する。

2.3.2 STAによるタイミング信号の再生と調整 STAはパラメータ(λとφ)が通知されると、図2に示したようにタイミング信号を再生する。具体的には、図3に示したパルス発生器に対してλを設定し、周期的なパルス信号の出力を適切な時刻に開始する。この処理の概略を図5に示す。適切な時刻とは、STAが受信したパラメータと現在のTFSFタイマの値から求められる、次回以降の立ち上がり予定時刻である。

STAのTFSFタイマはAPのそれに同期するため、STAのパルス発生器のタイミング信号は、出力開始から時間の経過とともに、STAのTFSFタイマに対して徐々にずれる。そのため、定期的にタイミング信号を調整する必要がある。図5に示すように、調整を行うためのタスクは、パラメータ推定のためのタ



スクと同様にCPU上では低優先度で実行され、CPU由来のジッタの影響を受ける。

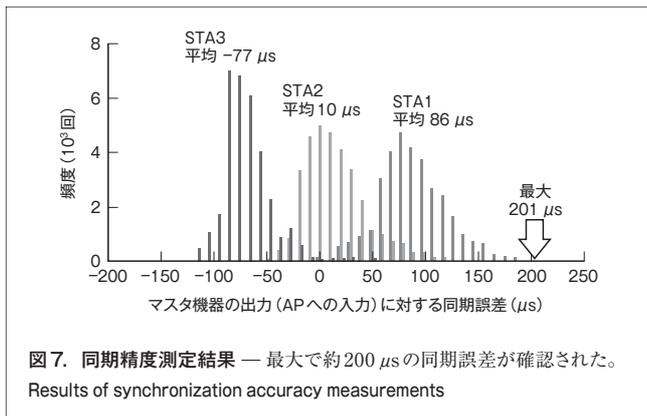
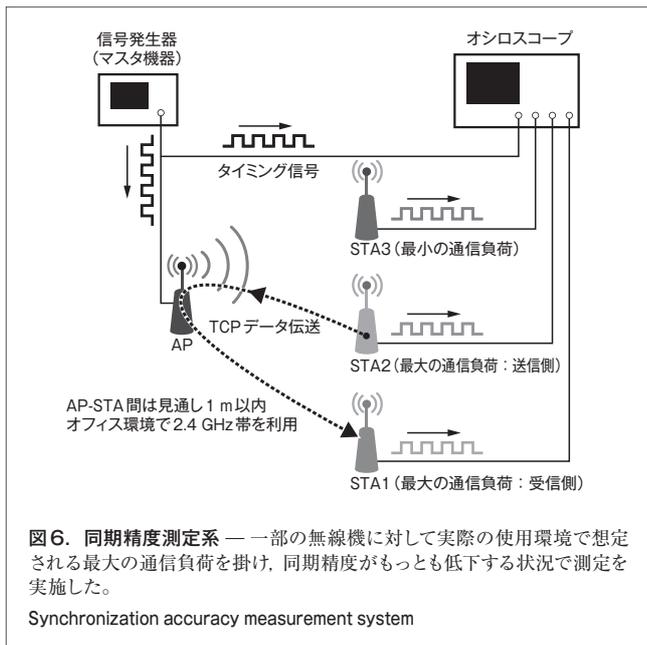
そこで、起動した調整タスクでTFSFタイマを読み、前記の立ち上がり予定時刻との差を計算する。この差が既定のしきい値以下、つまりジッタの影響が小さい場合だけ、パルス発生器の調整として出力の停止及び開始を行う。もし、ジッタの影響が大きい場合は、パルス発生器の調整は行わないが、このタスクは定期的起動され、次回以降でジッタの影響が少ない場合に調整が実行される。

3 評価

開発した無線同期システムの性能を、測定により評価した。同期精度の測定系の概要を図6に示す。IEEE 802.11n⁽⁴⁾準拠の1台のAPと3台のSTA(1~3)を使用し、マスタ機器に見たてた信号発生器から周期20msのパルス信号(タイミング信号, 50Hz相当)をAPに入力する。信号発生器と各STAの信号出力をオシロスコープで観測し、パルス信号の立ち上がり時間差を同期誤差として計測する。

前述のように、開発したシステムがソフトウェア実装であることから、CPUに掛かる通信処理負荷が同期精度に影響する。この影響の比較と、同期精度誤差を測定するために、STA2からSTA1へ通信速度測定モードでTCP(Transmission Control Protocol)データ伝送を行った。これにより、現実の環境で想定される最大の通信負荷の無線機(STA1とSTA2)と最小の通信負荷の無線機(STA3)がシステム内に混在する状況を作った。

結果を、マスタ機器の出力(APの入力)に対する各STAの



出力の同期誤差をヒストグラムとして、図7に示す。通信負荷が小さいSTA3の同期誤差がマイナスとなっているのは、STAのタイミング信号再生及び調整タスクの開始時刻を、全STAで一律に前倒しに補正しているためである。補正量は事前に補正なしで実施した測定結果に基づいて最大同期誤差が最小になるように設定した。今回の測定により、APに入力されるタイミング信号とSTAが再生するタイミング信号の最大同期誤差が200 μs程度であることが確認された。

4 あとがき

IoT時代において、多数の機器を協調して動作させるために当社が開発した無線同期制御技術について述べた。また、当社製無線LANモジュールに開発した技術を実現する機能をソフトウェア実装し、動作確認を行うことでこの技術の有効性を確認した。

無線による同期制御技術の応用先は多く、例えばデジタル

サイネージの同期を想定すると、現在一般的な毎秒30フレームの4倍速に相当する毎秒120フレームのフレーム間同期として、8.3 msの精度を一つのターゲットとして考えることができる。これに対する同期制御のためのタイミング信号として、開発した技術は約200 μsという十分な精度を持っている。デジタルサイネージ以外でも、例えば並列運転を行う電力インバータの交流位相同期や、産業用ロボットの作業タイミング合わせなどへの応用が期待できる。

今後、いっそうの高精度化や、安定化、大規模化などを含め、実用化に向けた研究を継続する。

文献

- (1) IEEE Std 802.11™ : 2012. IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks — Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- (2) 富澤俊明 他. “無線LANシステムにおける時刻同期方式の一検討(その1)”. 2014年電子情報通信学会総合大会講演論文集. 新潟, 2014-03, 電子情報通信学会. 2014, p.335.
- (3) 雨海明博. 有線LAN・無線LAN混在環境におけるサブマイクロ秒同期計測. 信学技報. 112, 406, 2013, p.9-14.
- (4) Tohzaka, Y. et al. "A Practical and Cost-Effective Cyclic Pulse Synchronization System using IEEE 802.11 Wireless LAN". IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Washington DC, USA, 2014-09, IEEE. 2014, p.2061-2065.

• IEEE及び802は、Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.の米国及びその他の国における商標又は登録商標。



東坂 悠司 TOHZAKA Yuji

研究開発センター ネットワークシステムラボラトリー。
無線リソース制御や無線ネットワーク応用の研究・開発に従事。
電子情報通信学会会員。
Network System Lab.



坂本 岳文 SAKAMOTO Takafumi

研究開発センター ネットワークシステムラボラトリー主任研究員。
無線通信システムの研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。
Network System Lab.



土井 裕介 DOI Yusuke, Ph.D.

研究開発センター ネットワークシステムラボラトリー主任研究員、
博士(情報理工学)。分散システムやネットワーク技術の研究・開発
に従事。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 情報処理学会会員。
Network System Lab.